

不同消毒方式对土壤酶活性及土传病原真菌消减的影响

运翠霞^{1,2} 严昌荣^{1,2} 徐明泽³ 刘恩科^{1,2} MORMILE Pasquale⁴
董雯怡^{1,2} 刘勤^{1,2*}

- (1. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;
2. 农业农村部农膜污染防治重点实验室, 北京 100081;
3. 北京市昌平区农业环境监测站, 北京 102200;
4. 意大利国家科学委员会 应用科学及智慧系统研究所, 意大利 罗马 00185)

摘要 为探究不同消毒方法对土壤环境的影响,本研究以北京昌平连作多年的草莓地为研究对象,通过设置田间试验对比物理防控方法活性炭+太阳辐射膜覆盖与化学熏蒸剂棉隆和氯化苦对土壤温度、养分和酶活性的影响及对土传病原真菌的消减效果。结果表明:高剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖可使土壤表层温度迅速升高至 50℃ 以上,在 0~10 cm 土层内对土传病原真菌镰刀菌和疫霉菌的减退率分别达 90% 和 85% 以上;活性炭的添加使土壤养分含量显著增加,同时激活土壤酶活性。然而,化学药剂棉隆和氯化苦熏蒸对镰刀菌和疫霉菌的减退率均达 95% 以上,但同时也降低了土壤养分含量和抑制了土壤酶活性。因此,活性炭+太阳辐射膜覆盖作为一种非化学土壤消毒方法,在改良土壤、连作地土传病原菌的防治具有较大的潜力,为实现连作草莓土传病害的绿色防控提供了新途径。

关键词 太阳辐射膜; 活性炭; 棉隆; 氯化苦; 酶活性; 镰刀菌; 疫霉菌

中图分类号 S668.4 **文章编号** 1007-4333(2020)12-0086-11 **文献标志码** A

Effects of different soil disinfection methods on soil enzyme activities and soil-borne diseases

YUN Cuixia^{1,2}, YAN Changrong^{1,2}, XU Mingze³, LIU Enke^{1,2}, MORMILE Pasquale⁴,
DONG Wenyi^{1,2}, LIU Qin^{1,2*}

- (1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;
2. Key Laboratory of Prevention and Control of Residual Pollution in Agricultural Film of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China;
3. Agricultural Environment Monitoring Station of Changping District, Beijing 102200, China;
4. Institute of Applied Sciences and Intelligent System, Italian National Research Council, Roman 00185, Italy)

Abstract In order to explore the impact of different disinfection methods on the soil environment, the strawberry field in Beijing Changping, which has been continuously cropped for many years was taken as research object. Field experiments were established to investigate the impact of different soil disinfection methods on soil temperature, nutrients, and enzyme activity, and its effect of reducing soil-borne pathogenic fungi. The results showed that: High-dose activated carbon + solarizing film could quickly increase the surface temperature of the soil to above 50℃. And the reduction effects on soil borne pathogenic fungi *Fusarium* spp. and *Phytophthora* spp. were better, and the reduction rates in the 0~10 cm soil layer were more than 90% and 85%, respectively. At the same time, soil nutrients

increased significantly and soil enzyme activity was activated with the addition of activated carbon. Although the chemical fumigants dazomet and chloropicrin fumigation had a good control effect on *Fusarium* spp. and *Phytophthora* spp., the content of soil nutrients and inhibited the activity of soil enzymes were also decreased. Therefore, the non-chemical soil disinfection method, active carbon + solar radiation film mulching, has great potential in improving soil and controlling soil borne pathogens during continuous cropping, which provides a new way for green control of soil borne diseases in continuous cropping fields.

Keywords solarizing film; dazomet; chloropicrin; active carbon; enzyme activity; *Fusarium* spp.; *Phytophthora* spp.

设施农业的发展为我国提高作物产量、促进农民增收、消除贫困和加快农村经济发展发挥了不可替代的作用^[1]。据国家统计局数据显示,我国草莓栽培面积从 2002 年 6.670 万 hm^2 增加到 2018 年 11.997 万 hm^2 。规模化的生产导致作物倒茬轮作困难,草莓连作问题日益严重,出现作物生长发育不良、土传病害加重的现象。连作栽培容易造成土壤理化性质劣变和土壤养分失衡,引起植物生长发育异常,导致产量与品质下降^[2]。引起连作障碍的最主要原因是土壤中病原物的多年累积^[3]。多年连作导致土传病原菌累积种类多、数量大,在土壤中存活时间长,土传病害的发生具有隐蔽性,而且大多数在草莓结果期达到发病高峰,导致草莓减产甚至绝收^[4]。

草莓种植主要采用化学药剂氯化苦和棉隆熏蒸土壤,以解决由土传病虫害引起的产量逐年下降、品质逐年降低的重茬问题^[5]。土壤熏蒸剂可有效杀灭土壤中的病原物,但在熏蒸的过程中也会抑制土壤中有益生物和影响非生物物质的化学转化过程^[6]。已有研究表明化学药剂熏蒸土壤后,严重破坏非靶标微生物类群,显著降低土壤酶活性和肥力,以及改变土壤微生物群落结构^[7-10]。此外,常年大量的施用化学农药,污染作物生长环境、破坏土壤微生物生态系统,同时大量的农药残留,造成了食品污染,进而危害人体健康^[11]。因此,寻求高效环保的新型土壤消毒技术,降低土壤中病原菌数量而改善土壤环境已经成为目前绿色农业发展的研究热点。

活性炭是竹炭、木炭、椰子壳等炭化形成的炭粉,植物种类不同炭化后的活性也有差异,效果较好的是炭化椰子壳^[12]。土壤施用活性炭后,有利于土壤中有益微生物的生长,抑制病原菌的繁殖,起到消毒杀菌的作用,是一种环保型土壤消毒技术^[13]。活性炭的添加可提高作物产量和改善果实品质,但是活性炭量的过量增加也会对作物产生胁迫作用,从而抑制作物的正常生长^[14]。Pasquale 等^[15]在太阳能高温消毒的基础上,通过在土壤表面撒施一层活性炭和覆盖太阳辐射膜,模拟热太阳能电池板,其原

理与增加土壤中水温的方式相同,此方法可以在较短的时间内获得较高的土壤温度并具有较强的杀菌效果。而关于采用活性炭+太阳辐射膜覆盖用于草莓连作地土传病害防治的相关研究尚未报道。因此,本试验以北京市昌平区兴寿镇华香园草莓种植基地多年种植草莓的连作土壤为研究对象,采用棉隆、氯化苦熏蒸剂和活性炭+太阳辐射膜覆盖三种土壤消毒方法,研究不同土壤消毒方法对土壤酶活性、土壤肥力以及土传病原菌消减的变化,对比不同土壤消毒方式对大棚草莓连作障碍的防治效果,以期对草莓绿色生产提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地基本概况

试验在北京市昌平区兴寿镇华香园草莓种植基地开展。全年平均日照时数为 2 684 h,平均气温为 11.8 $^{\circ}\text{C}$,降水量为 550.3 mm,四季分明,属暖温带大陆性季风气候。试验温室长 50 m,宽 8 m,连作草莓 10 年以上,上茬草莓于 2019 年 5 月收获。土壤基本理化性质为:有机质 19.59 g/kg、全氮 0.76 g/kg、速效磷 25.77 mg/kg、速效钾 335 mg/kg、pH 7.44、电导率(EC)236.42 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

1.2 试验设计及样品采集

供试材料为 98%棉隆微粒剂、99.5%氯化苦液剂和颗粒大小为 10 目的活性炭,具有高聚热性能的太阳辐射膜来源于意大利国家科学委员会应用科学及智慧系统研究所。

试验于 2019 年 6 月 29 日开始,共设 6 个处理:T1:棉隆(450 kg/hm^2);T2:氯化苦(450 kg/hm^2)、T3:活性炭(100 kg/hm^2)+太阳辐射膜、T4:活性炭(200 kg/hm^2)+太阳辐射膜、T5:活性炭(300 kg/hm^2)+太阳辐射膜、CK:不施药剂。每个处理重复 3 次,每个小区 20 m^2 ,随机区组排列,整地后将每个处理起垄隔开。具体操作如下:

1)棉隆微粒剂采用“全田混土法”施药,将药剂均匀撒施于土壤中,旋耕机进行旋耕,其深度为

20~25 cm,使棉隆药剂与耕层土壤充分混匀后,灌水使土壤含水量达50%~80%,最后覆膜熏蒸;

2)氯化苦采用机械注射法施药。使用专用施药机将氯化苦注入土壤中,注射深度为15~20 cm,间距为25 cm。然后采取“反向压膜法”将塑料膜四周密封,防止气体泄漏,同时关闭大棚风口进行熏蒸处理;

3)“活性炭+太阳辐射膜”的消毒需在处理前一天将土壤浇透,将活性炭均匀喷洒在土壤表面,覆盖太阳辐射膜。闷棚期间,在距地表下5、15、25 cm深度处理入地温探头,设定每隔30分钟自动记录一次温度数据。7月20日揭膜敞气,同时挖取探头。揭膜后,采用5点取样法分别从各小区取土样,取0~10 cm、10~20 cm的土样混匀,用冰盒装好带回测试。

1.3 测定项目及方法

土壤的基本理化性质:根据鲍士旦^[16]的标准方法进行分析测定。

土壤酶活性参照关松荫^[17]的方法测定;土壤蛋白酶采用茆三酮比色法,土壤脲酶采用苯酚钠-次氯酸钠比色法,土壤蔗糖酶采用3,5-二硝基水杨酸比色法。

土传病原菌的测定:土传镰刀菌属(*Fusarium*

spp.)的分离采用Komada等^[18]方法测定。土传疫霉属(*Phytophthora* spp.)的分离采用Masago等^[19]方法测定。

病原菌减退率=(对照病原菌数-处理病原菌数)/对照病原菌数×100%。

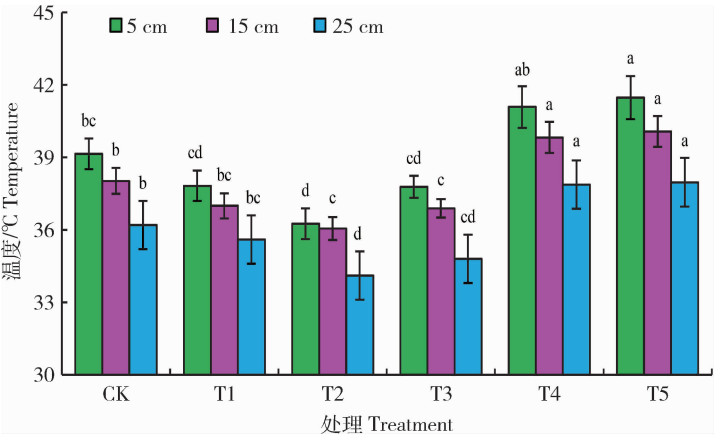
1.4 数据处理及分析

采用Excel 2010软件对试验数据进行整理,用SPSS 19.0软件进行方差分析,并采用Duncan法进行不同处理样本间差异显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同消毒方式对土壤温度的影响

图1为土壤消毒期间不同土层日均温。由图1可见:土壤的平均温度随着土层深度的增加而呈现下降趋势;不同处理的土壤平均温度变化趋势总体表现为T4和T5处理显著高于其他处理,T4和T5处理土壤温度之间无显著性差异,而与T3处理存在显著性差异,由此可看出高剂量的活性炭+太阳辐射膜覆盖可增加土壤温度。表明不同消毒方式对土壤温度的影响不同,而施用高剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖有利于土壤温度的增加,使得温室内土壤温度升温更快、更高,更容易达到病虫的致死温度,对各种土传病原菌有良好的防治效果。



CK:不施药剂;T1:棉隆(450 kg/hm²);T2:氯化苦(450 kg/hm²);T3:活性炭(100 kg/hm²)+太阳辐射膜;T4:活性炭(200 kg/hm²)+太阳辐射膜;T5:活性炭(300 kg/hm²)+太阳辐射膜。柱形上不同小写字母表示不同土层各处理间差异显著, $P<0.05$ 。下同。

CK, no medicine; T1, dazomet (450 kg/hm²); T2, chloropicrin (450 kg/hm²); T3, active carbon (100 kg/hm²) mulched solarizing film; T4, active carbon (200 kg/hm²) mulched solarizing film; T5, active carbon (300 kg/hm²) mulched solarizing film. Different lowercase letters on the column indicate significant differences between treatments in different soil layers, $P<0.05$. The same below.

图1 不同消毒方式下不同土层平均温度的变化

Fig.1 Changes of the average temperature of soil layers under different disinfection methods

土壤最高温度及持续时间反应高温闷棚的效果(图 2)。从 5、15 和 25 cm 土层内地温的变化可以看出,高温闷棚过程中,在土壤中添加高剂量活性炭和覆盖太阳辐射膜的 T4 和 T5 处理地温都较其他的温度高,尤其是 14:00 时的地温表现明显,5、15 和

25 cm 深处分别可达 60.0、51.6 和 44.2 °C(图 2)。并且随着土层深度的增加,土壤温度逐渐降低,25 cm 土层处一天内温度变化幅度较小(图 2c)。说明高剂量活性炭的添加和太阳辐射膜的覆盖可以改善土层结构,提高土壤温度,增加闷棚效果。

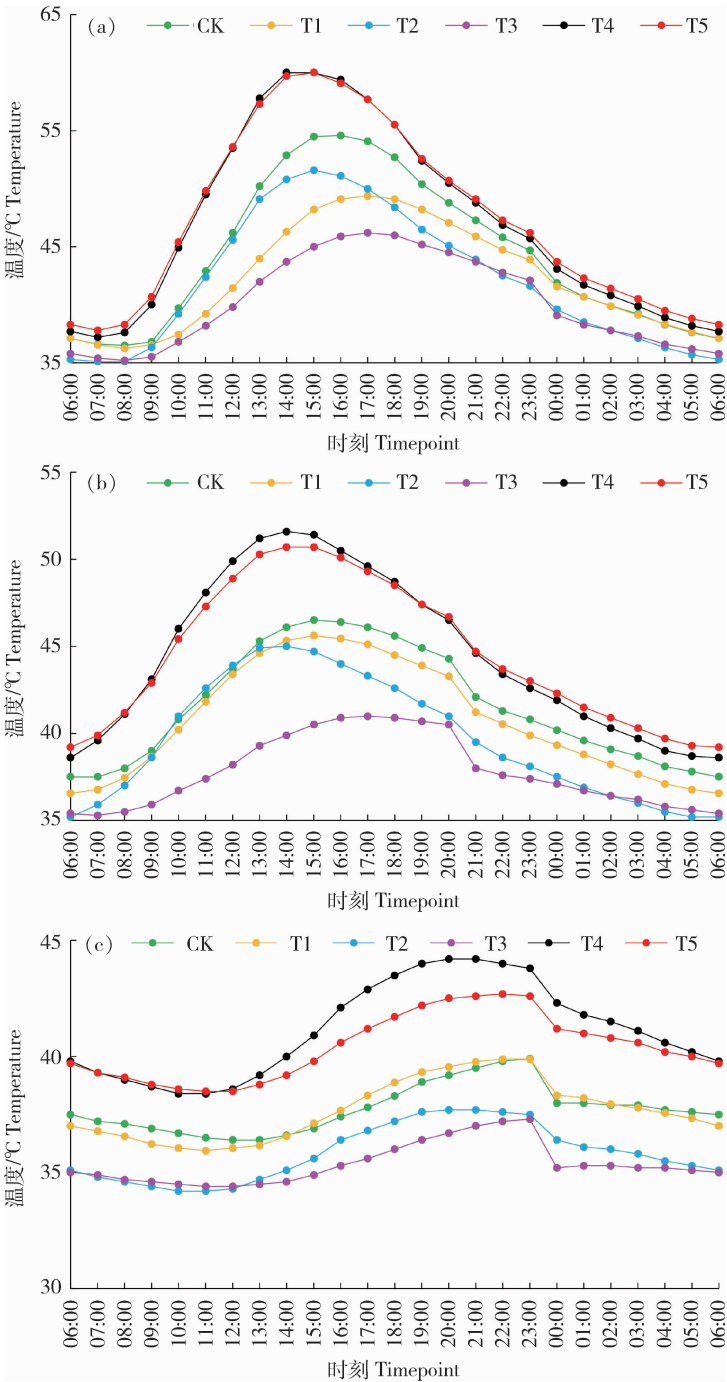


图 2 消毒期内不同处理不同土壤深度下 5 cm(a)、15 cm(b)和 25 cm(c)的温度变化

Fig. 2 Changes of soil temperature at different soil depths of 5 cm (a), 15 cm (b) and 25 cm (c) during disinfection

2.2 不同土壤消毒方式对土壤养分的影响

不同消毒方式处理对土壤养分含量变化如表 1 所示:在 0~10 cm 土层,与 CK 相比,T1 和 T2 处理后,土壤有机质和全氮含量无显著变化($P>0.05$);速效磷含量显著降低,分别降低 38%和 26%;而对于土壤速效钾含量,T1 处理后无显著变化,T2 处理后速效钾含量显著降低了 11%。不同剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖(T3、T4 和 T5)处理后,土壤全氮、速效钾和速效磷含量较 CK 相比均无显著性变化($P>0.05$)。随着活性炭量的添加,T3 和 T4 处理后土壤有机质含量无显著变化,而 T5 处理显

著增加了有机质含量,增幅为 11%。在 10~20 cm 土层上,与 CK 相比,T1 处理土壤有机质含量与 CK 相比无显著性差异,而其他处理均显著降低了有机质含量;不同消毒方式对土壤全氮含量均无显著性差异;对于土壤速效钾,T2 处理显著降低了其含量,T1(棉隆)和不同剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖(T3、T4 和 T5)对其含量无显著性差异;T1 和 T2 处理显著降低了土壤速效磷的含量,分别降低了 34%和 20%,而不同剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖(T3、T4 和 T5)对其含量无显著性差异($P>0.05$)。

表 1 不同消毒方式对不同土层土壤养分的影响
Table 1 Effects of different disinfection methods on soil nutrients at different soil layers

土层/cm Soil layer	处理 Treatment	有机质/(g/kg) Soil organic carbon	全氮/(g/kg) Total N	速效钾/(mg/kg) Available K	速效磷/(mg/kg) Available P
0~10	CK	21.77±1.03 b	0.95±0.02 a	294±8.02 ab	25.79±1.57 ab
	T1	20.34±1.24 b	1.08±0.15 a	292±11.68 ab	15.89±1.93 c
	T2	20.71±0.63 b	1.01±0.10 a	262±9.07 b	19.04±2.71 c
	T3	20.40±1.83 b	1.03±0.03 a	281±23.76 ab	23.34±2.62 b
	T4	20.83±1.67 b	1.06±0.03 a	285±23.67 ab	23.34±1.32 b
	T5	24.17±1.07 a	1.07±0.08 a	322±11.14 a	28.07±1.57 a
10~20	CK	25.87±3.14 a	0.88±0.08 a	355±26.87 a	23.22±1.28 a
	T1	21.92±1.88 ab	1.04±0.11 a	345±20.85 ab	15.36±1.45 b
	T2	21.19±1.50 b	1.00±0.07 a	292±28.68 c	18.55±1.41 b
	T3	20.61±0.67 b	1.04±0.08 a	301±27.35 bc	21.33±1.09 b
	T4	19.81±1.34 b	0.89±0.11 a	311±32.08 ab	22.94±1.13 a
	T5	21.71±0.47 b	1.02±0.09 a	339±13.23 ab	25.48±5.68 a

注:数据为均值±标准偏差,不同小写字母表示不同土壤深度各处理间差异显著, $P<0.05$ 。下同。
Note: The data listed are mean ± standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at different soil layers ($P<0.05$). The same below.

2.3 不同消毒方式对土壤酶活性的影响

2.3.1 对蔗糖酶活性的影响

土壤经不同消毒方式处理后,不同土层中蔗糖酶活性变化见图 3。由图 3 可见:0~10 cm 土层,T1、T2、T3 和 T4 处理均显著降低了蔗糖酶活性,而 T5 处理后蔗糖酶活性高于 CK 处理,其增幅为 30%。10~20 cm 土层内,T5 处理显著增加了其活性,达 71%。而其他消毒方式处理后与 CK 无显著性差异。这表明 T5(活性炭+太阳辐射膜覆盖)可

增加土壤中蔗糖酶活性。

2.3.2 对脲酶活性的影响

土壤脲酶活性与土壤中氮素循环密切相关,主要将尿素水解生成 NH_4^+ ,供给作物吸收利用。由图 4 可以看出:0~10 cm 土层内,T1 和 T2 处理显著降低了土壤脲酶活性,分别达 17%和 23%,而不同剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖(T3、T4 和 T5)处理脲酶活性变化不大。在 10~20 cm 土层,与 CK 相比,T1 和 T2 处理显著降低其活性,降幅分别为

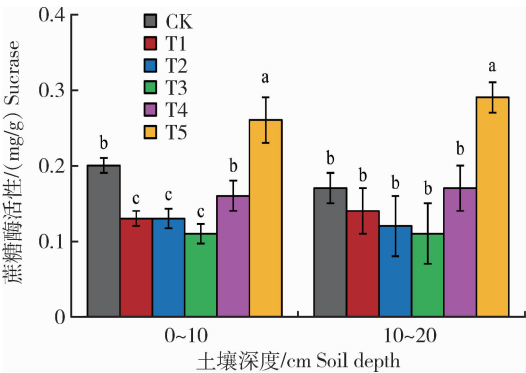


图 3 不同土壤处理方式对不同土壤深度蔗糖酶活性的影响

Fig. 3 Effects of different soil treatment methods on sucrase activity at different depths

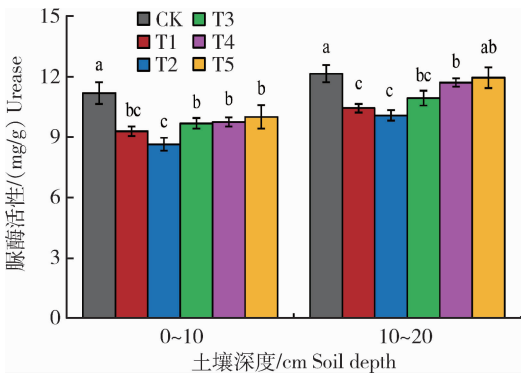


图 4 不同土壤消毒方式对不同土壤深度脲酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different soil disinfection methods on urease activity at different depths

14%和17%；而对于添加不同剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖处理，低剂量的活性炭则会导致脲酶活性下降。

表 2 不同土壤消毒方式对不同土壤深度镰刀菌的消减效果

Table 2 Reduction effects of *Fusarium* spp. by different soil disinfection methods at different layers

处理 Treatment	剂量/ (g/m ²) Dosage	0~10 cm		10~20 cm	
		样品中镰刀菌数量/(cfu/g) Population of <i>Fusarium</i> spp per gram of soil	减退率/% Decline rate	样品中镰刀菌数量/(cfu/g) Population of <i>Fusarium</i> spp per gram of soil	减退率/% Decline rate
T1	45	27±46 c	100	20±11 c	100
T2	45	107±50 c	99	47±31 c	100
T3	10	740±156 b	93	3 340±2 717 b	76
T4	20	107±70 c	99	1 987±1 227 bc	86
T5	30	113±76 c	99	1 127±791 bc	92
CK	0	10 120±126 a	—	13 950±123 a	—

2.3.3 对蛋白酶活性的影响

由图 5 分析可得,0~10 cm 土层内,T5 处理与 CK 相比无显著性差异,而其他处理较 CK 相比,均显著降低了蛋白酶的活性,降幅分别达 21%、46%、51%和 35%。而在 10~20 cm 土层中,T4 和 T5 处理的蛋白酶活性与 CK 无显著性差异($P>0.05$),而 T1、T2 和 T3 与 CK 相比,显著降低了其酶活性,降幅分别达 26%、37%和 37%。结果表明:施用棉隆(T1)和氯化苦(T2)降低了土壤中蛋白酶活性,从而影响土壤中氮的矿化过程和有机含氮化合物的水解。

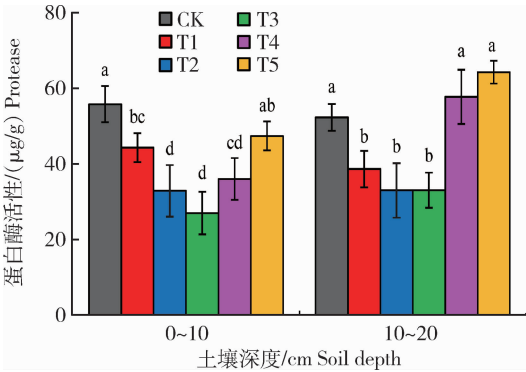


图 5 不同土壤消毒方式对不同土壤深度蛋白酶活性的影响

Fig. 5 Effects of different soil disinfection methods on protease activity at different soil depths

2.4 不同消毒处理对土传病原菌的影响

2.4.1 不同消毒方式对镰刀菌属真菌的影响

从表 2 可以看出,不同土层镰刀菌发生均较严重,且土层越深发病越严重。0~10 cm 和 10~20 cm 土层,化学熏蒸剂 T1(棉隆)和 T2(氯化苦)处理土

壤中镰刀菌的消减效果均在 98% 以上。不同剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖(T3、T4、T5)处理,在 0~10 cm 土层中土壤中镰刀菌的消减效果分别为 93%、99%、99%;在 10~20 cm 土层中土壤中镰刀菌的杀灭效果分别为 76%、86%、92%。说明活性炭+太阳辐射膜覆盖对镰刀菌有一定的防除效果,且 T4 和 T5 处理与化学熏蒸剂 T1(棉隆)和 T2(氯化苦)处理相比,对镰刀菌的消减效果无显著差异($P>0.05$)。

表 3 不同土壤消毒方式对不同土层疫霉菌的消减效果

Table 3 Reduction effects of *Phytophthora* spp. by different soil disinfection methods at different soil layers

处理 Treatment	剂量/ (g/m ²) Dosage	0~10 cm		10~20 cm	
		样品中疫霉菌数量/(cfu/g) Population of <i>Phytophthora</i> spp per gram of soil	减退率/% Reduction rate	样品中疫霉菌数量/(cfu/g) Population of <i>Phytophthora</i> spp per gram of soil	减退率/% Reduction rate
T1	45	113±100 c	99	140±106 c	99
T2	45	307±319 c	97	293±216 c	99
T3	10	1 320±288 b	88	3 780±1 621 b	68
T4	20	460±485 c	96	4 660±985 b	62
T5	30	140±92 c	99	3 260±342 b	72
CK	0	10 960±812 a	—	11 840±682 a	—

3 讨 论

3.1 土壤消毒对温度和养分的影响

李英梅等^[20]研究表明不同消毒方式对土壤温度和土壤养分有着显著的影响。本研究发现随着活性炭量的添加土壤温度也增加,土层越浅,土壤温度升温越快,这可能与活性炭的孔隙结构、较大比表面积和覆盖高聚热性能的太阳辐射膜有关,与 Pasquale 等^[15]研究结果一致。杨叶青等^[21]研究表明棉隆和氯化苦在有效控制土壤有害线虫种群数量的同时,对有益线虫和土壤养分有明显的负作用。本研究结果显示棉隆消毒后土壤速效磷含量显著下降,而土壤有机质、全氮和速效钾含量无显著性变化,与曾祥国等^[22]研究结果相一致。然而,也有研究报道施用化学药剂熏蒸土壤之后,土壤酶活性显著下降且微生物数量显著减少,从而导致土壤养分含量降低^[23]。造成这一结果差异的原因很可能来自于棉隆施用剂量的差异及土壤质地的差异。本研究表明氯化苦熏蒸后土壤速效磷和速效钾含量均显

2.4.2 不同消毒方式对疫霉菌属真菌的影响

不同消毒方式处理土壤之后,分离测定疫霉菌数量如表 3。在 0~10 cm 土层,与 CK 相比,化学药剂棉隆(T1)和氯化苦(T2)对疫霉菌的防效达 95% 以上;而对于不同剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖处理,随着活性炭量的添加,对疫霉菌的防效越佳。10~20 cm 土层上,2 种化学熏蒸剂对于疫霉菌的消减效果均达 99% 以上,不同剂量的活性炭添加后的消减率随着活性炭的添加而增加,其中以 T5 处理的防效最佳。

著降低。由此推断,氯化苦作为一种警戒性农药,熏蒸过程中杀死了一些有利于土壤养分循环的微生物,降低土壤酶活性,从而影响土壤肥力的产生。活性炭是植物炭化后形成的一种空隙结构发达的炭质材料,其主成分除了碳以外还有氢、氧、氮等元素,施用活性炭可增加土壤氮、磷含量,促进作物的生长发育^[24-26]。本研究中发现低剂量的活性炭+太阳辐射膜覆盖会对土壤养分有抑制作用,高剂量活性炭+太阳辐射膜覆盖增加了土壤速效磷和全氮的含量,而对于添加活性炭的最适剂量还需要进一步的试验验证。

3.2 土壤消毒对酶活性的影响

土壤酶是土壤中植物、动物和微生物的活动产物,其参与土壤中营养物质转化、有机质分解、污染物降解以及土壤修复等方面,是评价土壤质量和健康状况的重要指标^[27]。其中:土壤脲酶是参与土壤氮素转化的关键酶,可以培肥土壤,对提高氮肥利用率具有重要意义;蔗糖酶活性强弱可反应土壤熟化程度和肥力水平,对增加土壤中易溶性物质起重要

作用,而其活性大小与土壤有机质、氮、磷、钾含量,微生物数量以及土壤呼吸强度等密切相关^[28];土壤蛋白酶作为分解土壤有机含氮化合物重要的水解酶,不仅是土壤氮矿化过程的限速酶,而且其活性还能反映土壤的环境质量状况^[29],因此这三种酶对于维持土壤正常生理活动具有重要意义。然而,化学熏蒸剂在有效杀灭土传病原菌和线虫等有害生物的同时;另一方面也抑制了多种酶活性、降低土壤中非靶标微生物的数量和活性和显著改变微生物的群落结构以及功能多样性,破坏土壤生态系统的平衡^[30-31]。熏蒸后的土壤有可能会被病原菌二次感染,致使消毒效果持续性差^[32]。本结果显示施用熏蒸剂棉隆和氯化苦均显著降低了土壤酶活性,与范琳娟等^[33]研究结果一致。连作土壤中添加活性炭可提高酶活性,并改善土壤生物学环境^[34-36]。在连作土壤中加入活性炭对土壤酶活性的影响,显示添加活性炭可增加土壤蔗糖酶活性,蔗糖酶活性与土壤有机质、氮、磷含量,微生物数量以及土壤呼吸强度息息相关^[37]。活性炭对连作棉田土壤酶活性的影响表明,土壤中加入活性炭会使土壤生物活性改善明显,对土壤蔗糖酶活性有促进作用^[36]。本研究中活性炭的添加提高了蔗糖酶活性,其原因是活性炭改变了土壤养分含量、pH等,从而引起蔗糖酶活性的变化。棉隆和氯化苦处理均降低了土壤脲酶活性,可能是棉隆和氯化苦易与土壤酶分子结合,形成稳定的复合物,抑制底物与酶分子的结合,导致脲酶活性降低,由此延缓尿素水解成氨,影响作物对氨的吸收^[37-39],其机理还需进一步研究。添加活性炭对脲酶活性影响不大,这与高丹美等^[40]研究结果一致。本试验中施用棉隆和氯化苦均降低了土壤中蛋白酶活性,应与棉隆的降解产物异硫氰酸甲酯对蛋白酶的钝化作用有关^[22]。氯化苦熏蒸显著降低了土壤中蛋白酶活性,与马涛涛等^[41]研究结果不一致的原因可能与大田试验与室内恒温培养试验的微环境条件不同有关,也可能与前茬种植作物以及日常施肥管理等措施不同有关。

3.3 土壤消毒对土传病原真菌的影响

化学药剂熏蒸土壤,对根结线虫以及土壤病原真菌疫霉菌、镰刀菌均具有较好的防效^[33,42-44]。本研究也发现化学药剂棉隆与氯化苦熏蒸后显著减少了土壤中镰刀菌和疫霉菌的数量,对土传病原菌达到了较好的防治效果。棉隆作为一种常见的异硫氰酸甲酯产生物,可以迅速杀灭土传病原线虫、真菌、

地下害虫^[21];而氯化苦是一种高毒化学农药,进入生物体组织后,能生成强酸性物质,使细胞肿胀腐烂,还可使细胞脱水,细胞内蛋白质沉淀,使细胞中毒死亡,对害虫的成虫、幼虫熏杀力很强,从而有效防治作物重茬病害^[45-48]。物理升温防治病原菌的研究表明大多数病原菌的致死温度为39~43℃^[49]。因此,在高温季节耕地休闲时期对土壤覆盖塑料薄膜,通过温室效应吸收太阳辐射热来提高土壤温度从而杀死土壤中的有害生物^[50-51]。李英梅等^[52]研究的垄沟式太阳能消毒主要是通过增加土壤的采光面,提高土壤温度,从而有效杀灭土壤中的病原菌。本研究中闷棚期间土壤表面撒施活性炭并且覆盖太阳辐射膜后的土壤温度可达到杀病原菌的温度。土壤表面撒施的活性炭(太阳能集热器)和具有高聚热性能的塑料膜覆盖,比传统的太阳能消毒法使土壤更快、更容易升温,从而在更短的时间内杀灭土壤病原菌。

4 结 论

化学熏蒸剂在对土传病原菌镰刀菌和疫霉菌具有较好的防除效果,但是也破坏了土壤养分、微生物生存环境,降低土壤酶活性。而利用活性炭+太阳辐射膜覆盖对土壤进行消毒处理,在对土传病原菌达到一定防除效果的同时,随着活性炭的添加也适当增加土壤养分和激活土壤酶活性,为作物生长发育提供了良好的生存环境和所需的养分,也为实现草莓连作障碍的绿色防控提供了新途径。

参考文献 References

- [1] 刘霓红,蒋先平,程俊峰,李惠玲,李苇,薛坤鹏,侯露,熊征. 国外有机设施园艺现状及对中国设施农业可持续发展的启示[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 1-9
Liu N H, Jiang X P, Chen J F, Li H L, Li W, Xue K P, Hou L, Xiong Z. Current situation of foreign organic greenhouse horticulture and its inspiration for sustainable development of Chinese protected agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 1-9 (in Chinese)
- [2] 高志华,张学英,葛会波,郑丽锦. 草莓根系分泌物障碍效应的模拟研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008(1): 189-193
Gao Z H, Zhang X Y, Ge H B, Zheng L J. Modeling the obstacle effects of strawberry root exudates[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2008 (1): 189-193 (in Chinese)

- [3] 侯慧, 董坤, 杨智仙, 董艳, 汤利, 郑毅. 连作障碍发生机理研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(6): 1068-1076
Hou H, Dong K, Yang Z X, Dong Y, Tang L, Zheng Y. Advance in mechanism of continuous cropping obstacle[J]. *Soils*, 2016, 48(6): 1068-1076 (in Chinese)
- [4] 毛连纲, 颜冬冬, 吴篆芳, 马涛涛, 王秋霞, 李园, 郭美霞, 欧阳灿彬, 曹勘程, 郑建秋. 土壤化学熏蒸效果的影响因素述评[J]. 农药, 2013, 52(8): 547-551
Mao L G, Yan D D, Wu Z F, Ma T T, Wang Q X, Li Y, Guo M X, Ouyang C B, Cao A C, Zheng J Q. Review of affecting factors of soil fumigation[J]. *Agrochemicals*, 2013, 52(8): 547-551 (in Chinese)
- [5] Li X Y, Liu Q Z, Wang Y Z, Sun C Q, Bai E L. Different changes of soil nematode communities in replant and continuous-planting peach orchards and their indicative value for peach replant problem[J]. *Helminthologia*, 2015, 52(3): 261-269
- [6] 仇欢, 朱玉坤, 乔康, 王开运. 磷化铝对土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 143-148
Ji H, Zhu Y K, Qiao K, Wang K Y. Effects of aluminum phosphide on soil microbial population and enzyme activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1): 143-148 (in Chinese)
- [7] Klose S, Acosta-Martínez A, Ajwa H A. Microbial community composition and enzyme activities in a sandy loam soil after fumigation with methyl bromide or alternative biocides[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1243-1254
- [8] Ladd J N, Brisbane P G, Butler J H A, Amato M. Studies on soil fumigation. III: Effects on enzyme activities, bacterial numbers and extractable ninhydrin reactive compounds[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(4): 255-260
- [9] Jawson M D, Franzluebbers A J, Galusha D K. Soil fumigation within monoculture and rotations: Response of corn and mycorrhizae[J]. *Agronomy Journal*, 1993, 85(6): 1174-1180
- [10] 王方艳, 王秋霞, 颜冬冬, 毛连纲, 郭美霞, 燕平梅, 曹勘程. 二甲基二硫熏蒸对保护地连作土壤微生物群落的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 890-896
Wang F Y, Wang Q X, Yan D D, Mao L G, Guo M X, Yan P M, Cao A C. Effects of dimethyl disulfide on microbial communities in protectorate soils under continuous cropping[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 890-896 (in Chinese)
- [11] 黄新琦, 温腾, 孟磊, 张金波, 朱同彬, 蔡祖聪. 土壤快速强烈还原对于尖孢镰刀菌的抑制作用[J]. 生态学报, 2014, 34(16): 4526-4534
Huang X Q, Wen Q, Meng L, Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C. The inhibitory effect of quickly and intensively reductive soil on *Fusarium oxysporum*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16): 4526-4534 (in Chinese)
- [12] 张庭发, 杨进波, 易小光, 杨航, 李小东. 土壤消毒方法综述[J]. 云南农业, 2017(12): 43-45
Zhang T F, Yang J B, Yi X G, Yang H, Li X D. A review on soil disinfection methods[J]. *Yunnan Agriculture*, 2017(12): 43-45 (in Chinese)
- [13] 龙光桥. 设施土壤的药物消毒方法[J]. 湖南农业, 2008(4): 18
Long G Q. Medicine disinfection method for facility soil[J]. *Hunan Agriculture*, 2008(4): 18 (in Chinese)
- [14] Sampietro D A, Sgariglia M A, José R. Soberón, Quiroga E N, Vattuone M A. Role of sugarcane straw allelochemicals in the growth suppression of arrowleaf sida[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(3): 495-503
- [15] Pasquale M, Massimo R, Lucia P. Improvement of soil solarization through a hybrid system simulating a solar hot water panel[J]. *Journal of Advanced Agricultural Technologies*, 2016(9)
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 中国农业出版社, 2005
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [17] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986
Guan S Y. *Soil Enzyme and Its Study Method* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986 (in Chinese)
- [18] Komada H. Development of a selective medium for quantitative isolation of *Fusarium oxysporum* from natural soil[J]. *Review of Plant Protection Research*, 1975, 8(13): 114-125
- [19] Masago H, Yoshikawa M, Fukada M. Selective inhibition of *Pythium* spp on a medium for direct isolation of *Phytophthora* spp from soil and plants[J]. *Phytopathology*, 1977, 77(3): 425-428
- [20] 李英梅, 田朝霞, 徐福利, 陈志杰, 张锋, 张淑莲. 不同土壤消毒方法对日光温室土壤温度和土壤养分的影响[J]. 西北农业学报, 2009, 18(6): 328-331
Li Y M, Tian C X, Xu F L, Chen Z J, Zhang F, Zhang S L. Effect of different soil disinfectant on soil temperature and soil nutrient in sunlight greenhouse[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2009, 18(6): 328-331 (in Chinese)
- [21] 杨叶青, 范琳娟, 刘奇志, 李维华, 宋兆欣. 棉隆和氯化苦熏蒸对重茬草莓土壤线虫群落及养分含量的影响[J]. 园艺学报, 2018, 45(4): 725-733
Yang Y Q, Fan L J, Liu Q Z, Li W H, Song Z X. Effects of dazomet and chloropicrin on the soil nematode communities and nutrient content of replanted strawberry[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2018, 45(4): 725-733 (in Chinese)
- [22] 曾祥国, 韩永超, 张庆华, 余继明, 向发云, 过聪, 陈丰滢. 不同浓度棉隆熏蒸对草莓土壤微生物多样性的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(S2): 42-45
Ceng X G, Han Y C, Zhang Q H, Yu J M, Xiang F Y, Guo C, Chen F Y. Effects of different concentrations dazomet fumigation on the microbial diversity in strawberry continuous

- cropping soil[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2018, 57(S2): 42-45 (in Chinese)
- [23] 范琳娟, 刘奇志, 宋兆欣, 李维华. 氯化苦对重茬草莓土壤生物和非生物因子的影响[J]. *农药*, 2017, 56(2): 131-134
Fan L J, Liu Q Z, Song Z X, Li W H. Effects of chloropicrin on biotic and abiotic factors in soil for continuous cropping strawberry[J]. *Agrochemicals*, 2017, 56(2): 131-134 (in Chinese)
- [24] Mizuta K, Matsumoto T, Hatate Y, Nishihara T, Nakanishi T. Removal of nitrate-nitrogen from drinking water using bamboo powder charcoal[J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95(3): 255-257
- [25] Berglund L M, Deluca T H, Zackrisson O. Activated carbon amendments to soil alters nitrification rates in Scots pine forests[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(12): 2067-2073
- [26] Laird, David A. The charcoal vision: A win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality[J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 178-181
- [27] 罗明, 庞峻峰, 李叙勇, 刘平, 万兰英. 新疆天山云杉林区森林土壤微生物学特性及酶活性[J]. *生态学杂志*, 1997(1): 27-31
Luo M, Pang J F, Li X Y, Liu P, Wan L Y. Microbiological characteristics and enzymes activity of the forest-soil in *Picea schrenkiana* var *tianshanican* in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997(1): 27-31 (in Chinese)
- [28] 张洁, 夏明聪, 刘红彦, 张猛, 米国权, 杨丽荣. 低剂量棉隆熏蒸联合生物菌肥防治黄瓜根结线虫病的应用效果[J]. *植物保护学报*, 2019, 46(4): 824-831
Zhang J, Xia M C, Liu H Y, Zhang M, Mi G Q, Yang L R. Efficacy of dazomet fumigation and bioorganic fertilizer in integrated control of cucumber root-knot nematode [J]. *Journal of Plant Protection*, 2019, 46(4): 824-831 (in Chinese)
- [29] Scopa A, Dumontet S. Soil solarization: Effects on soil microbiological parameters[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2007, 30(4): 537-547
- [30] 张威, 张明, 张旭东, 张乐, 李维福. 土壤蛋白酶和芳香氨基酶的研究进展[J]. *土壤通报*, 2008(6): 1468-1474
Zhang W, Zhang X D, Zhang L, Li W F. A review on soil protease and arylamidase[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008(6): 1468-1474 (in Chinese)
- [31] 曹云, 宋修超, 郭德杰, 王秋君, 马艳, 沈其荣. 棉隆熏蒸与微生物有机肥联用对西瓜枯萎病的防控研究[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 93-100
Cao Y, Song X C, Guo D J, Wang Q J, Ma Y, Shen Q R. Prevention and control of watermelon *Fusarium* wilt by dazomet fumigation combined with bio-organic fertilizer[J]. *Soils*, 2018, 50(1): 93-100 (in Chinese)
- [32] Ślusarski C, Pietr S J. Combined application of dazomet and trichoderma asperellum as an efficient alternative to methyl bromide in controlling the soil-borne disease complex of bell pepper[J]. *Crop Protection*, 2009, 28(8): 668-674
- [33] 范琳娟, 刘奇志, 宋兆欣, 李维华. 温室重茬草莓土壤施用棉隆和氯化苦效果评价[J]. *农药*, 2017, 56(4): 293-296
Fan L J, Liu Q Z, Song Z X, Li W H. Evaluation of dazomet and chloropirin effectiveness on replanted soil in greenhouse strawberry[J]. *Agrochemicals*, 2017, 56(4): 293-296 (in Chinese)
- [34] Jin H Y. Characterization of microbial life colonizing biochar and biochar-amended soils [D]. Ithaca: Cornell University, 2010
- [35] 杨林, 陈志明, 刘元鹏, 王玉军. 石灰、活性炭对铬污染土壤的修复效果研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(3): 518-525
Yang L, Chen Z M, Liu Y P, Wang Y J. Effectives of lime and activated carbon on remedying chromium contaminated soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 518-525 (in Chinese)
- [36] 张伟, 孙艳艳, 李彦斌, 刘建国, 刘俊. 活性炭处理对连作棉田土壤酶活性的影响[J]. *新疆农业科学*, 2009, 46(4): 789-792
Zhang W, Sun Y Y, Li Y B, Liu J G, Liu J. Effect of activated charcoal treatment on the activities of soil enzymes of continuous cropping cotton field[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2009, 46(4): 789-792 (in Chinese)
- [37] 孙艳艳, 蒋桂英, 刘建国, 张伟, 唐志敏. 加工番茄连作对农田土壤酶活性及微生物区系的影响[J]. *生态学报*, 2010, 30(13): 3599-3607
Sun Y Y, Jiang G Y, Liu J G, Zhang W, Tang Z M. Effects of continuous cropping tomato for processing on soil enzyme activities and microbial flora[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(13): 3599-3607 (in Chinese)
- [38] 卜东欣, 张超, 张鑫, 丛聪, 王金信. 熏蒸剂威百亩对土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(15): 227-233
Bu D X, Zhang C, Zhang X, Cong C, Wang J X. Effects of fumigant metham-sodium on soil microbial population and enzyme activities[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(15): 227-233 (in Chinese)
- [39] 马吉平, 陈庆隆, 王洪秀, 姚健, 陈柳萌, 丁晨. 除草剂氯嘧磺隆对 6 种土壤酶活性影响研究[J]. *江西农业学报*, 2014, 26(6): 29-33
Ma J P, Chen Q L, Wang H X, Yao J, Chen L Y, Ding C. Effects of herbicide chlorimuron-ethyl on activities of 6 kinds of enzymes in soil[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(6): 29-33 (in Chinese)
- [40] 高丹美, 吴凤芝, 周新刚. 活性炭对土壤酶活性及黄瓜幼苗生长的影响[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(6): 1154-1161
Gao D M, Wu F Z, Zhou X G. Effects of activated carbon on soil enzyme activities and cucumber seeding growth [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(6): 1154-1161